# مطالعات تجربی و نظری روی توربین بادی محور قائم از نوع روتور ساونیوس پیشرفته*

مجید جمیل[۱]		سید حامد رسولی[۲]

**چکیده** *در این مقاله، عملکرد توربین بادی ساونیوس بررسی شده و با یک شبیه سازی عددی به‌وسیله‌ی نرم افزار FloEFD دو نوع مختلف توربین بادی محور قائم با روتور ساونیوس متداول و روتور ساونیوس پیشرفته، با یکدیگر مقایسه شده و نشان داده می شود که ضریب گشتاور استاتیکی روتور ساونیوس پیشرفته در حدود ۱۱ درصد از روتور ساونیوس متداول بیشتر است. هم‌چنین تغییرات ضریب توان* $c_p$ *توربین ساونیوس پیشرفته نصب شده و در دست بهره برداری در منطقه‌ی مشکین دشت شهرستان کرج مورد بررسی قرار گرفته و راه کارهایی برای بهبود عملکرد این توربین ارائه شده است.*

**واژه‌های کلیدی** روتور ساونیوس متداول، روتور ساونیوس پیشرفته، شبیه سازی عددی، میدان سرعت و فشار باد، ضریب توان، ضریب گشتاور استاتیکی

## Experimental & Numerical Study on an Advanced Vertical Axis Savonius Rotor

M. Jamil		S. H. Rasouli

**Abstract** *In this paper the performance of a Savonius wind turbine has been studied both experimentally and theoretically using the FloEFD software. Two different types of vertical axis Savonius rotor, namely, conventional and advanced rotors, have been compared. It is shown that the coefficient of static moment for an advanced Savonius rotor is about 11% more than that for a conventional one. A study has also been conducted to investigate the variation of the power coefficient for the advanced Savonius rotor installed in MERC and recommendations have been presented to enhance its performance.*

**Key Words** Advanced and Conventional Savonius Rotors, Numerical Simulation, Wind Velocity and Pressure Field, Power Coefficient, Static Moment.

---

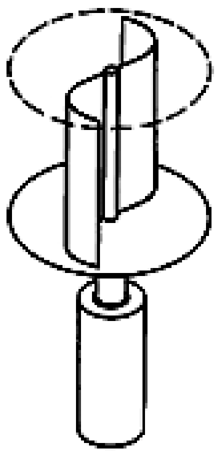
*نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۱۳۸۸/۱۱/۱۰ و نسخه‌ی نهایی آماده چاپ آن در تاریخ ۱۳۸۹/۷/۲۵ می‌باشد.

(۱) عهده‌دار مکاتبات: پژوهشگاه مواد و انرژی کرج

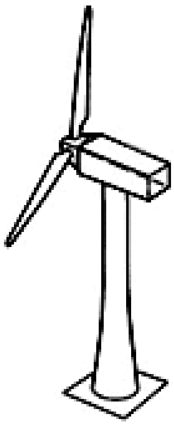
(۲) دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، گروه مکانیک

## مقدمه

امروزه بهره گیری از انرژی بادی به منظور تولید انـرژی پاک و ارزان یکی از گزینه‌های متداول در سراسر جهان است. بدین منظور، توربین های بادی بـرای استحصـال انرژی بادی و تبدیل آن به انرژی مکانیکی و الکتریکـی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روتور ساونیوس (شکل ۱) نوعی از توربین‌های بـادی محـور قـائم ( ertical Axis Wind Turbine (VAWT)) است که به دلیل فـن آوری ساده‌ی آن، مستقل بودن چرخش روتور از جهت وزش باد (خودگرد)، سرعت دورانی پایین و گشتاور تولیـدی بالا، مورد علاقه‌ی بسـیاری از محققـین و پژوهشـگران قرار گرفته است. اما روتـور سـاونیوس در مقایسـه بـا تـوربین هـای محـور افقـی ( Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)) (شـکل۲) دارای معـایبی همچـون بـازدهی پـایین، یکنواخـت نبـودن گشـتاور تولیـدی و سرعت دورانی پایین است که برای تولید برق بـادی در مقیـاس چنـد کیلـووات، چنـدان مناسـب نمـی باشـد. عملکرد این نوع روتور، برای شارژ باتری و یا مصـارف کوچکتر، نظیر آب‌کشی از چاه‌های کم عمـق، رضـایت بخش است. [2 و ۱].

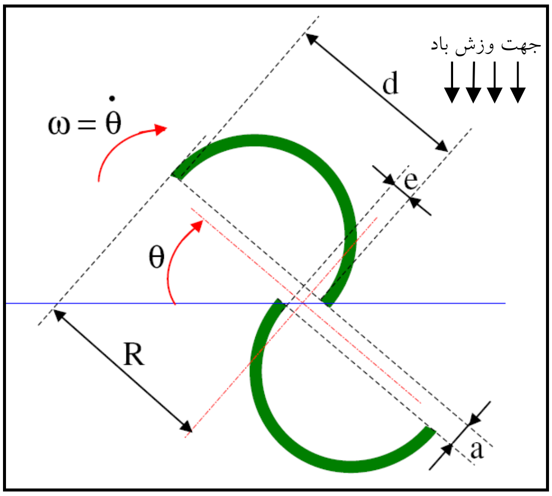


شکل ۱  توربین بادی محور قائم از نوع روتور ساونیوس [2]



شکل ۲  توربین بادی محور افقی [2]

مطالعات بر روی نوع خاصی از روتور ساونیوس که روتور ساونیوس متداول ( Conventional Savonius Rotor (CSR)) نامیـده مـی شـود، بسـیار متعـدد و متنوعند [3]. نمای مقطع افقی این روتور در شـکل (۳) و نیز مشخصات آن در جدول (۱) ارائه شده است.




شکل ۳  نمای مقطع افقی روتور ساونیوس متداول (CSR)

جدول ۱  مشخصات روتور ساونیوس متداول [4]

| پارامتر | مقدار |
|---|---|
| هم‌پوشانی اولیه e | 0.2 D |
| هم‌پوشانی ثانویه a | 0 |

در مورد روتور ساونیوسی با شعاع پره R ، ارتفاع H ، سرعت وزش باد V و سرعت زاویه ای ω، ضریب سرعت λ (نسبت سرعت لبه پره روتور به سرعت باد (نسبت سرعت لبه پره : Tip Speed Ratio (TSR) )، توان مکانیکی P و گشتاور مکانیکی M به صورت ذیل تعریف می شوند:

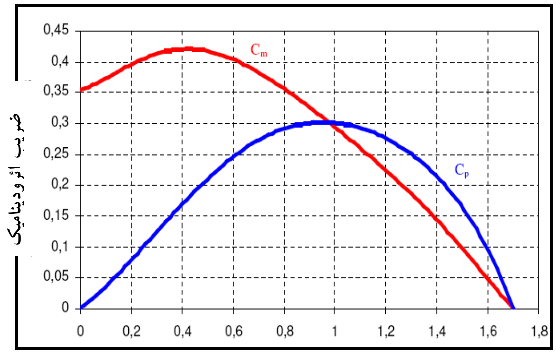
$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (۱)$$

$$P = c_p \, \rho \, R \, H \, V^3 \quad (۲)$$

$$M = c_m \, \rho \, R^2 \, H \, V^2 \quad (۳)$$

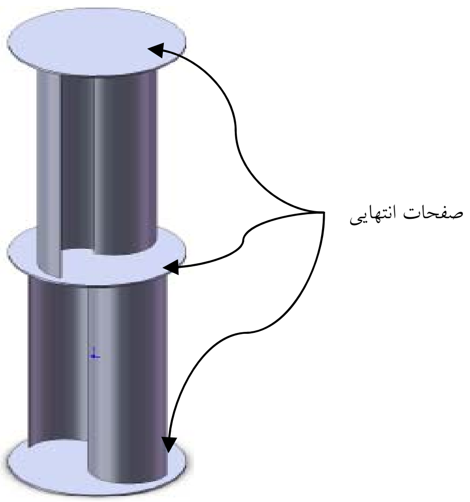
که در آن، $c_p$ و $c_m$ به ترتیب؛ ضریب توان مکانیکی و گشتاور مکانیکی هستند و معمولاً به صورت تابعی از λ ارائه می‌شوند (شکل٤). اگر بازدهی توربین بادی (η) نسبت توان تولیدی آن به حداکثر توانی که یک توربین ایده آل می‌تواند تولید کند تعریف شود، آنگاه:

$$\eta = \frac{P}{P_{id}} = \frac{c_p}{\frac{16}{27}} = \frac{27}{16} c_p \quad (٤)$$




شکل ٤ تغییرات ضرایب $c_p$ و $c_m$ با λ برای روتور ساونیوس متداول [4]

تاکنون مطالعات و بررسی‌های متعددی در سراسر جهان برای یافتن پارامترهای مؤثر بر بازدهی روتور ساونیوس متداول به منظور دست‌یابی به بیشترین بازدهی انجام شده است [3]. بر اساس این پژوهش ها برای دست‌یابی به بیشترین بازدهی، روتور ساونیوس متداول باید دارای ۲ طبقه و در هر طبقه دارای ۲ پره باشد که پره ها در هر طبقه نسبت به هم، ۹۰ درجه زاویه داشته باشند (شکل ٥). گرچه تعداد بیشتر طبقات میزان توان استحصالی را ارتقاء می دهد، ولی تأثیری بر بازدهی روتور ندارد و تنها منجر به افزایش اینرسی روتور می‌شود؛ همچنین تعداد بیشتر پره‌ها در هر طبقه، اگر چه به تولید گشتاور یکنواخت کمک می‌کند، اما در بسیاری از موارد، بازدهی روتور را کاهش و هزینه‌ی ساخت توربین را افزایش می‌دهد. سایر مشخصات توربین ساونیوس متداول بهینه از قبیل ارتفاع بهینه‌ی روتور، شعاع بهینه و میزان بهینه‌ی هم‌پوشانی در جدول (۲) ارائه شده است[4].

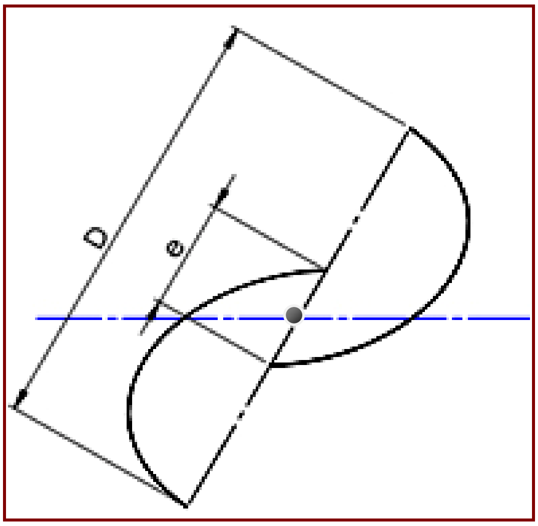



شکل ٥ وضعیت پره‌های روتور ساونیوس در طبقات اول و دوم جهت دست‌یابی به بالاترین بازدهی

جدول ۲ مشخصات روتور ساونیوس متداول (بهینه شده برای دست‌یابی به بالاترین توان)

| | |
|---|---|
| تعداد طبقات توربین | $2 \rightarrow \infty$ |
| تعداد پره ها در هر طبقه | 2 |
| شعاع صفحات انتهایی $R_f$ | 1.1R |
| ارتفاع روتور H | 4R |
| هم‌پوشانی اولیه e | $0.15D \rightarrow 0.3D$ |
| هم‌پوشانی ثانوی a | 0 |

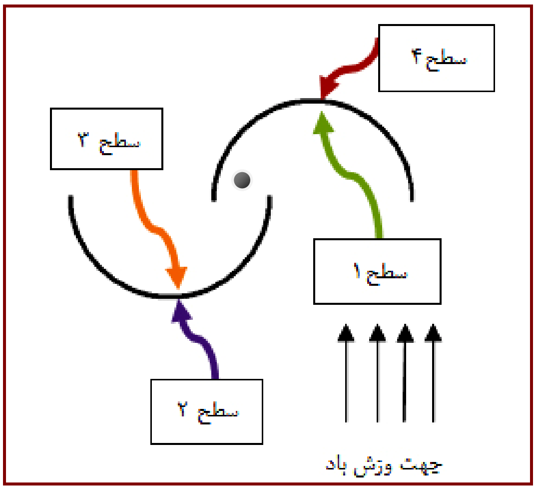
در این مقاله بـه طـور خـاص، عملکـرد روتـور سـاونیوس پیشـرفته (Advanced Savonius Rotor (ASR)) بررسی می‌شود (شکل ٦). تفاوت اصلـی ایـن نوع روتور در شکل پره های آن نسبت بـه پـره هـای روتور ساونیوس متداول است. این نـوع روتـور، ماننـد روتور سـاونیوس متـداول، بـرای نخسـتین بـار توسط ساونیوس در سال ۱۹۳۱ ارائه شـد [5 و 12]. او معتقـد بود که این پره نسبت به سایر اشکال پـره هـای روتـور ساونیوس دارای ضریب توان بـالاتری اسـت و ضـریب توان آن را در حدود ۳۷ درصـد بـرآورد کـرد. در سـال ۱۹۷۳ در دانشگاه کانزاس، ترنکوئیست و همکارانش [5] توربین بادی مطابق بر آن چه که ساونیوس در مقالاتش ارائه کرده بـود، در ابعـاد بـزرگ سـاختند؛ اما حـداکثر ضریب توانی که توربین آنها به دست آورد، چیـزی در حدود ۳۰ درصد بود. پس از آن در سال ۱۹۷۸ خان [6] در آزمایش‌هایی که بر روی روتور سـاونیوس پیشـرفته در تونل باد انجام داد، به ضـریب تـوانی در حـدود ۳٦ درصـد دسـت یافـت. در ایـران نیـز چنـدین پـروژه‌ی تحقیقاتی بر روی روتور ساونیوس پیشرفته و همچنین روتور ساونیوس متداول انجام شده است [۱ و ۷ و ۸].




شکل ٦ نمای مقطع افقی روتور ساونیوس پیشرفته (ASR)

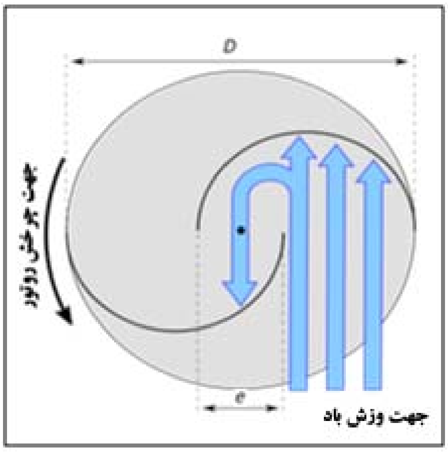
## تشریح عملکرد روتور ساونیوس متداول و پیشرفته

روتور ساونیوس مطابق شکل (۳) دارای ۲ پره است که یک پره‌ی آن از سمت تقعر و دیگری از سمت تحـدب رو به باد قرار می‌گیرد. برای بررسـی عملکـرد تـوربین ساونیوس مفید است که سطوح پره ها را مطابـق شـکل (۷) نام‌گذاری کنیم:

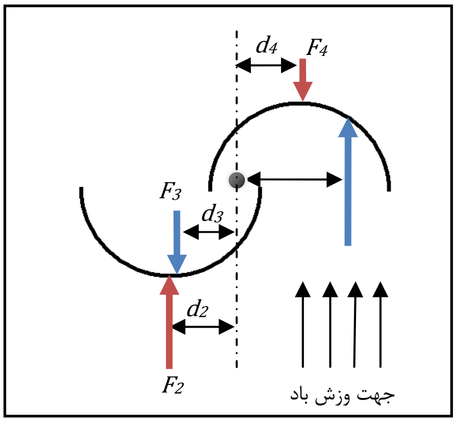



شکل ۷ نام‌گذاری سطوح روتور ساونیوس

هنگامی که باد بـه پـره هـای روتـور سـاونیوس می‌وزد، نخسـت بـا ایجـاد فشـار بـر سـطح ۱ و ۲، دو نیروی $F_1$ و $F_2$ را ایجاد می کنـد (شـکل (۹))، کـه در این میان اندازه‌ی نیـروی $F_1$ از $F_2$ بزرگتـر بـوده و در نتیجه گشتاوری در جهت خـلاف جهت عقربـه هـای ساعت ایجاد کرده که منجر بـه چـرخش روتـور حـول محورش می شـود. پـس از آن بـه دلیـل فـرم سـطح ۱ بخشی از جریان هوا به سوی سطح ۳ منحرف شده و بر آن می‌وزد (شکل (۸)) و بـدین ترتیـب، نیـروی $F_3$ را تولید می‌کند. نیروی $F_4$ در اثر مقاومت هوای ساکن در پشت پره‌ی روتور ایجاد می شود.




شکل ۸ نمایش شماتیک رفتار فیزیکی جریان هوا در برخورد به روتور ساونیوس (چه در حالت استاتیک و چه در حالت دینامیک روتور ساونیوس بخشی از هوا از فاصله‌ی هم‌پوشانی می گذرد)




شکل ۹ نیروهای وارد بر روتور ساونیوس در $\theta = 0^{\circ}$

با توجه به شکل (۹) واضح است که برای افزایش بازدهی روتور ساونیوس طراح باید پره های روتور را به گونه‌ای طراحی کند که اولاً مقادیر نیروهای $F_1$ و $F_3$ حداکثر و مقادیر نیروهای $F_2$ و $F_4$ حداقل شود، ثانیاً بازوی گشتاور نیروهای $F_1$ و $F_3$، یعنی فواصل $d_1$ و $d_3$ بیشترین و بازوی گشتاور نیروهای $F_2$ و $F_4$ یعنی فواصل $d_2$ و $d_4$ کم‌ترین باشند. برای طراحی پره‌هایی با فرم جدید باید به نکات مندرج در ذیل توجه کرد:

۱. مقادیر نیروهای $F_1$، $F_2$، $F_3$ و $F_4$ و همچنین فواصل $d_1$ و $d_2$ و $d_3$ و $d_4$ در روتور ساونیوس متداول موجب ایجاد گشتاور برآیند M می شوند که این گشتاور، نه در زاویه‌ی $\theta = 0^{\circ}$ بلکه در زوایای $\theta = 40^{\circ}$ تا $\theta = 60^{\circ}$ حداکثر مقدار خود را پیدا می‌کند. برای کسب اطلاعات بیشتر در این زمینه به مراجع [3 و 4 و 6] مراجعه شود.

۲. در صورتی که میزان هم‌پوشانی اولیه e در شکل (۳) برابر صفر باشد، نیروی $F_3$ که به سطح شماره ۳ وارد می شود، برابر صفر خواهد بود و بدین ترتیب بازدهی روتور ساونیوس کاهش می یابد. هم‌چنین، گرچه ممکن است که با افزایش میزان هم‌پوشانی اولیه‌ی e، نیروی $F_3$ افزایش یابد، ولی در این صورت فواصل $d_1$، $d_3$ و نیز نیروی $F_1$ به شدت کاهش می یابد که این امر، نهایتاً منجر به کاهش بازدهی توربین ساونیوس می‌شود. میزان بهینه هم‌پوشانی اولیه در منابع مختلف علمی، از e=0.15D تا e=0.3D گزارش شده است که در آن D قطر روتور است [4,9].

۳. نیروهای ایرودینامیکی $F_1$، $F_2$، $F_3$ و $F_4$ در واقع از جنس نیروی درگ فشاری (Pressure Drag) هستند و مهندس طراح برای افزایش بازدهی توربین ساونیوس با توجه به رهیافتی که در بالا بدان اشاره شد، می‌بایست پره های روتور را بر اساس افزایش ضریب درگ (Drag coefficient) سطح شماره ۱ و کاهش ضریب درگ در سطح شماره ۲ طراحی کند. ساونیوس نیز در سال ۱۹۳۱ با توجه به این اصل مهم، طرح پره روتور ساونیوس پیشرفته را ارائه کرد. تاکنون تلاش‌هایی برای افزایش بازدهی روتور ساونیوس صورت گرفته؛ مثلاً برخی از پژوهشگران با ایجاد پیچش در پره های ساونیوس (شکل (۱۰)) سعی در بهبود عملکرد آن داشته‌اند [14].

تاکنون در خصوص طراحی شکل‌های جدید پره‌های روتور ساونیوس تحقیقات محدودی انجام شده است [10].



شکل ۱۰ روتور ساونیوس با پره های مارپیچ

٤. توان تولیدی توربین ساونیوس تابعی از پارامترهای مندرج در زیر است که می توان آن‌ها را به سه دسته کلی تقسیم کرد:

۱. پارامترهای هندسی روتور:
- شکل پروفیل پره های روتور،
- قطر روتور $D\,[m]$،
- ارتفاع روتور $H\,[m]$،
- میزان همپوشانی اولیه $e\,[m]$،
- قطر شفت میانی توربین $e'[m]$.

۲. پارامترهای جریان هوا:
- لزجت $\mu\,[Pa\cdot s]$
- چگالی هوا $\rho_{air}\,[kg/m^3]$
- سرعت وزش باد $V\,[m/s]$

۳. پارامترهای دینامیکی روتور:
- سرعت زاویه‌ی روتور $\omega\,[rad/s]$

در صورتی که از حضور قاب توربین و هم‌چنین محور میانی آن چشم پوشی شود با استفاده از تئوری $\pi$ باکینگهام و روش هانساکر و رایتمایر [۱۵] به راحتی می‌توان نشان داد که ضریب توان روتور ساونیوس $c_p$ تابعی از اعداد بی بعد زیر است:

$$c_p = f\left[Re = \frac{\rho V D}{\mu},\ \lambda = \frac{R\omega}{V},\ \frac{H}{D},\ \frac{e}{D}\right] \qquad (۵)$$

حال برای بررسی اثر هر یک از اعداد بی بعد ارائه شده در بالا باید سه عدد بی بعد را ثابت و دیگری را متغیر درنظرگرفت و اثر آن را بر توان روتور بررسی کرد. خوشبختانه پژوهش‌های زیادی در مورد دو عدد بی بعد $\frac{H}{D}$ و $\frac{e}{D}$ روتور ساونیوس متداول انجام شده است؛ بدین ترتیب که در اکثر منابع گزارش شده، اگر $\frac{H}{D} = 2$ , $\frac{e}{D} = 0.2$ باشد، توربین ساونیوس نوع متداول دارای بالاترین ضریب توان است.

اما در مورد دو عدد $\lambda$ و $Re$ نتایج به دست آمده در پژوهش‌ها دارای تفاوت هایی هستند. دلیل این امر، ماهیت دینامیکی بسیار پیچیده‌ی جریان حول روتور ساونیوس است؛ زیرا گشتاور تولیدی روتور ساونیوس به دلایلی که پیشتر گفته شد در هر زاویه روتور دارای مقدار متفاوتی است و از این رو توان روتور نیز در هر زاویه تغییر می کند:

$$P = M(\theta,\lambda)\times\omega \qquad (٦)$$

بنابراین بهترین روش، در نظرگرفتن مقداری متوسط برای گشتاور تولیدی است که آن را از زاویه‌ی روتور نسبت به جهت وزش باد مستقل نماید (رابطه ۳) یعنی:

$$M = c_m\ \rho\ R^2 H\ V^2$$

که در آن، $c_m$ ضریب گشتاور نامیده می شود و تابعی از $\lambda$، $Re$، $\frac{e}{D}$ و $\frac{H}{D}$ است. به راحتی می توان نشان داد که [9]:

$$\lambda = \frac{c_p}{c_m} \qquad (۷)$$

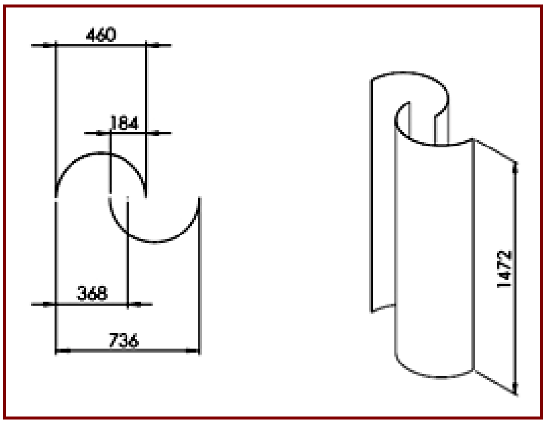
در نتیجه داریم:

$$c_m = \frac{c_p}{\lambda} \qquad (۸)$$

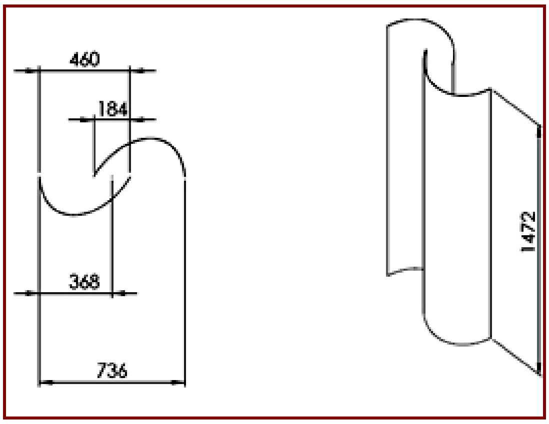
رابطه‌ی (۸) از آن جهت اهمیت دارد که با اندازه گیری تجربی $c_p$ و $\lambda$، به آسانی می توان $c_m$ را محاسبه کرد.

## شرح مدل و شبیه سازی عددی

جریان باد، حول پره‌های روتور ساونیوس به دلیل ماهیت دینامیکی آن بسیار پیچیده است. در واقع بدون در نظرگرفتن پارامترهای گوناگونی نظیر حضور شاسی، محور مرکزی دوار و غیره، هر گونه شبیه سازی عددی نمی‌تواند ماهیت فیزیکی جریان را به طور دقیق نمایان سازد؛ ولی این شبیه سازی می‌تواند معیاری تقریبی به منظور طراحی و ساخت توربین باشد. ژان لوک مؤنه محقق فرانسوی [4] با بررسی جریان حول روتور ساونیوس متداول به این نتیجه رسیده است که اگرچه رفتار توربین ساونیوس یک رفتار دینامیکی است، ولی با یک شبیه سازی در حالت استاتیکی روتور خطایی حداکثر در حدود ۸ درصد به وجود می آید که از نظر مهندسی قابل قبول می باشد. هدف در این مقاله، مقایسه طبیعت جریان در دو نوع روتور ساونیوس متداول و پیشرفته می باشد. با استناد به مطلب فوق در این بخش، نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار FloEFD (جهت آشنایی بیشتر با نرم افزار FloEFD به نشانی www.mentor.com مراجعه شود) را در حالت استاتیکی و در زوایای $\theta = \{0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \ldots, 165^\circ\}$ برای دو روتور ساونیوس متداول و ساونیوس پیشرفته ارائه می شود. توجه به این نکته ضروری است که توربین ساونیوس دارای دوره ی تناوب ۱۸۰ درجه است؛ به این معنا که حالت قرارگیری روتور در زاویه‌ی صفر درجه مانند حالت قرارگیری روتور در زاویه‌ی ۱۸۰ درجه می‌باشد. این شبیه سازی عددی، همان‌طور که در ادامه مشاهده می شود، ۳ بعدی است و از این لحاظ در بین پژوهش‌های قبلی، کم نظیر است و کمک شایانی به درک فیزیک جریان و همچنین مقایسه‌ی آن در دو نوع روتور ساونیوس متداول و پیشرفته می‌کند. به لحاظ سه بعدی بودن شبیه سازی حاضر، آگاهی از هندسه‌ی دقیق مدل های شبیه سازی شده ضروری می‌باشد؛ بنابراین در شکل های (۱۱) و (۱۲) هندسه‌ی روتور های شبیه سازی شده، نمایش داده شده است.




شکل ۱۱ ابعاد هندسی روتور ساونیوس متداول شبیه سازی شده (بر حسب mm)




شکل ۱۲ ابعاد هندسی روتور پیشرفته شبیه سازی شده (بر حسب mm)

در این شبیه سازی، اعداد بی بعد $\frac{e}{D}$ و $\frac{H}{D}$ و $\lambda$ و Re به ترتیب دارای مقادیر زیر هستند که برای هر دو نوع روتور متداول و پیشرفته یکسان می باشد:

$$\frac{e}{D} = 0.25 \quad \frac{H}{D} = 2$$
$$\lambda = \frac{R\omega}{V} = 0 \quad Re = \frac{\rho V D}{\mu} = 3.33 \times 10^5$$

لازم به ذکر است که در شبیه سازی هر دو روتور ساونیوس متداول و پیشرفته، در کلیه‌ی زوایا سرعت وزش باد ثابت و برابر ٦ متر بر ثانیه در نظر

گرفته شده است. پروفیل هندسی روتور ساونیوس پیشرفته بر اساس جدول (۷) رسم شده که مختصات مندرج در آن، از مرجع [5] استخراج شده است. شبیه سازی انجام شده در مقاله‌ی حاضر، یک شبیه سازی استاتیکی است و ضریب گشتاور استاتیکی به‌دست آمده از آن، یعنی $c_{ms}$ متفاوت از ضریب گشتاور دینامیکی تعریف شده در رابطه‌ی (۸) است و این ضریب نیز تابعی از شکل هندسی پروفیل پره و اعداد بی بعد $\frac{e}{D}$ ، $\frac{H}{D}$ و Re می باشد. محاسبه $c_{ms}$ دارای مزایای ذیل است:

الف- با محاسبه‌ی $c_{ms}$ می‌توان گشتاور راه انداز توربین را در هر زاویه‌ی دلخواه برآورد کرد.

ب- از آن‌جا که مقدار $c_{ms}$ ارتباط مستقیمی با ضریب درگ و ضریب لیفت پره های روتور دارد، می توان نتیجه گرفت که هر کدام از روتورهای ساونیوس متداول و پیشرفته که دارای ضریب گشتاور استاتیکی بالاتری است، ضریب درگ و ضریب لیفت پره های آن نیز بالاتر است و در نتیجه بازدهی بیشتری هم دارد.

در این شبیه سازی، هر بار روتور ساونیوس در یک زاویه‌ی مشخص به طور ثابت در برابر جریان باد قرار گرفته و از نرم افزار FloEFD خواسته شده که گشتاور وارد بر آن را اندازه گیری نماید و سپس مقدار $c_{ms}$ را محاسبه کند. شرایط شبیه سازی مانند فشار، سرعت و دمای هوا در کلیه‌ی حالات، برای هر دو نوع روتور ساونیوس یکسان فرض شده است تا به این ترتیب بتوان مقایسه ای در شرایط یکسان بین دو روتور ساونیوس متداول و پیشرفته انجام داد و نقش شکل هندسی پره ها را بهتر بررسی نمود. شرایط شبیه سازی در زاویه‌ی ٦٠ درجه برای روتور ساونیوس پیشرفته برای نمونه در جداول (۳)، (٤) و (٥) آورده شده است. جهت آگاهی از سایر شرایط شبیه سازی عددی در دیگر زوایا با مؤلفین مقاله‌ی حاضر، مکاتبه شود.

جدول ۳ تعداد سلول های شبکه در شبیه سازی عددی روتور ساونیوس پیشرفته در زاویه‌ی ٦٠ درجه

| | |
|---|---|
| تعداد کل سلول های شبکه | ۲۱۹۰۰۳ |
| تعداد سلول های شبکه ی سیال | ۲۱٤٤٦۱ |
| تعداد سلول های جزیی شبکه | ٤٥٤۲ |
| تعداد سلول های غیر منظم شبکه | ۰ |
| تعداد سلول های ناقص شبکه | ٤٤٦ |

جدول ٤ مختصات دامنه‌ی محاسباتی در شبیه سازی عددی روتور ساونیوس پیشرفته در زاویه‌ی ٦٠ درجه

| | |
|---|---|
| X min | -2.62466848 m |
| X max | 2.62466848 m |
| Y min | -2.98571584 m |
| Y max | 2.98571584 m |
| Z min | -2.43452777 m |
| Z max | 3.9345264 m |

جدول ٥ شرایط محیطی شبیه سازی عددی روتور ساونیوس پیشرفته در زاویه‌ی ٦٠ درجه

| | |
|---|---|
| پارامترهای ترمودینامیکی | فشار استاتیکی = ۱۰۱۳۲٥ پاسکال<br>دما = ۲۹۳/۲ درجه ی کلوین |
| پارامترهای سرعت | سرعت در جهت محور X = صفر متر بر ثانیه<br>سرعت در جهت محور Y = صفر متر بر ثانیه<br>سرعت در جهت محور Z = ٦ متر بر ثانیه |
| پارامترهای توربولانس | شدت توربولانس = ۰/۱ درصد<br>طول توربولانس = ٤ میلی متر |

## بحث و بررسی نتایج شبیه سازی عددی

به منظور طراحی پره های جدید باید در هر زاویه به خوبی از تغییرات میدان فشار و سرعت جریان باد حول پره های ساونیوس آگاه بود. برای دو زاویه‌ی ٦٠ و ۹۰ درجه، این تغییرات در شکل های (۱٤)، (۱٥)، (۱٦) و (۱۷) نمایش داده شده است. در شکل‌های (۱٤) و (۱٥)

مشاهده می‌شود که نیروی مؤثر چرخش توربین به دلیل افت فشار بر روی سطح ٤ ایجاد می شود؛ بنابراین چون شکل پره‌ی روتور ساونیوس پیشرفته به ایرفویل نزدیک تر است، این افت فشار بیشتر بوده و مساحت بیشتری را شامل می شود. در نتیجه $c_{ms}(90^\circ)$ آن از روتور ساونیوس متداول بیشتر است. پس از به دست آوردن مقادیر $c_{ms}$ در زوایای صفر تا ١٦٥ درجه برای دو روتور ساونیوس متداول و پیشرفته این مقادیر در جدول (٦) درج شده است.

جدول ٦ ضریب گشتاور استاتیکی برای روتور ساونیوس متداول و پیشرفته

| $\theta(deg)$ | $c_{ms}(CSR)$ | $c_{ms}(ASR)$ |
|---|---|---|
| 0 | 0.21 | 0.19 |
| 15 | 0.28 | 0.29 |
| 30 | 0.39 | 0.45 |
| 45 | 0.54 | 0.61 |
| 60 | 0.56 | 0.68 |
| 75 | 0.40 | 0.47 |
| 90 | 0.24 | 0.36 |
| 105 | 0.22 | 0.17 |
| 120 | 0.25 | 0.19 |
| 135 | 0.31 | 0.27 |
| 150 | 0.1 | 0.15 |
| 165 | 0.09 | 0.14 |
| 180 | 0.21 | 0.19 |

این نتایج به وسیله‌ی نرم افزار MathCAD2000 و به کمک توابع Spline مکعبی درون‌یابی شده و نمودار شکل (١٣) به دست آمده است. $c_{ms}$ تابعی از $\frac{e}{D}$، $\frac{H}{D}$، Re و $\theta$ است یعنی:

$$c_{ms} = f\left(\frac{e}{D},\ \frac{H}{D},\ Re,\ \theta\right) \qquad (٩)$$

مقادیر متوسط ضریب گشتاور استاتیکی برای هر دو روتور ساونیوس متداول و پیشرفته از طریق انتگرال گیری از منحنی های شکل (١٣) و بر اساس رابطه‌ی (١٠) به دست آمده و این مقادیر عبارتند از:

$$\bar{c}_{ms} = \frac{\int_{0^\circ}^{180^\circ} c_{ms}(\theta)\, d\theta}{180} \qquad (١٠)$$

$$\bar{c}_{ms}(ASR) = 0.336 \qquad (١١)$$

$$\bar{c}_{ms}(CSR) = 0.300 \qquad (١٢)$$

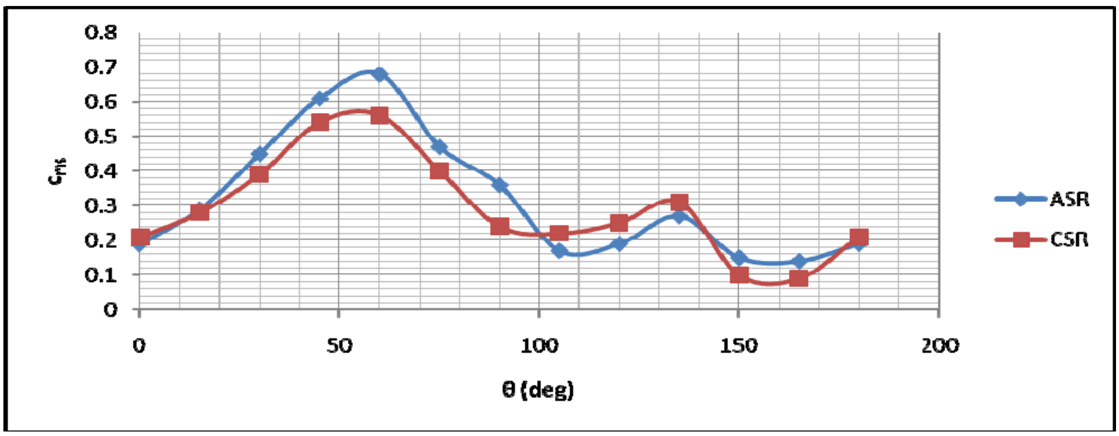
$$\frac{\bar{c}_{ms}(ASR) - \bar{c}_{ms}(CSR)}{\bar{c}_{ms}(ASR)} \times 100 = 10.7\% \qquad (١٣)$$

بر پایه‌ی این شبیه سازی و مقادیر به دست آمده در روابط (١١) و (١٢) در صورتی که اعداد $\frac{e}{D} = 0.25$، $\frac{H}{D} = 2$ و $Re = 3.33\times10^5$ باشند، ضریب گشتاور استاتیکی روتور ساونیوس پیشرفته ١٠/٧ درصد از روتور ساونیوس متداول بیشتر است.

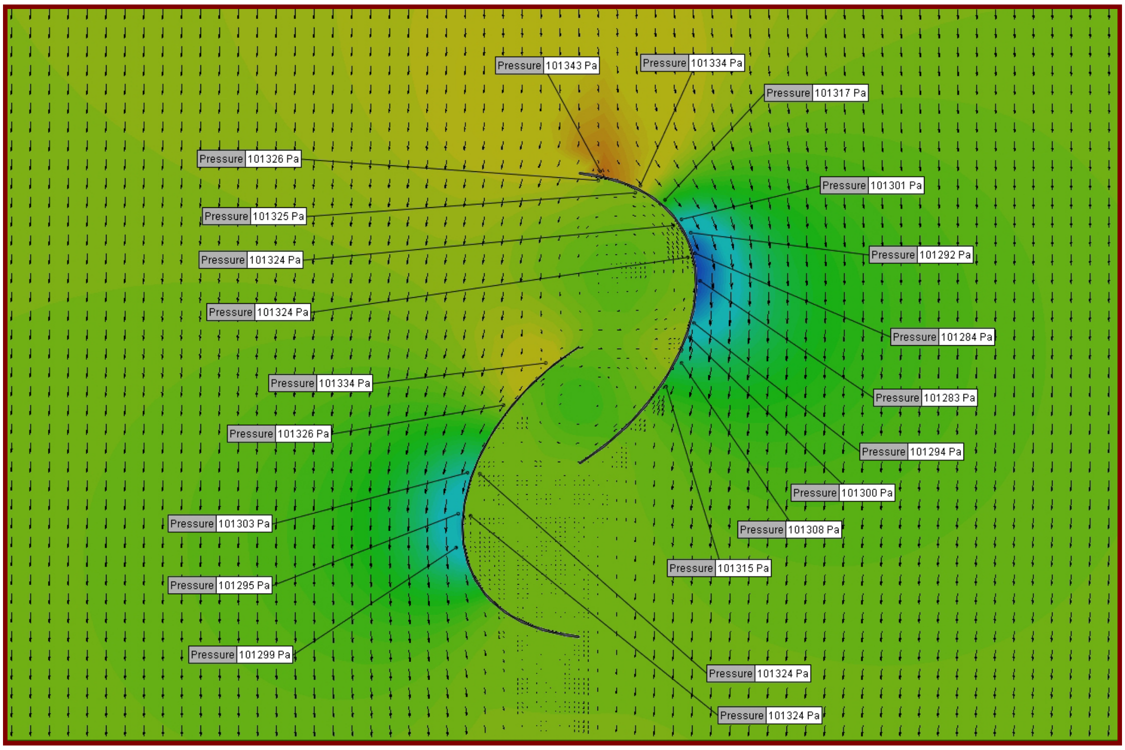
با توجه به نمودار شکل (١٣)، می‌توان این نکته را درک کرد که در محدوده‌ی زوایای ١٣٥ تا ١٨٠ درجه، گشتاور وارد بر روتور ساونیوس چه از نوع پیشرفته و چه از نوع متداول آن، دارای کم‌ترین مقدار است؛ اما این گشتاور هرگز صفر یا منفی نیست. در برخی از مراجع در محدوده‌ی زوایای فوق گشتاور منفی هم برای توربین ساونیوس متداول گزارش شده است [3,4]. این امر ناشی از تفاوت در اعداد بی بعد $\frac{e}{D}$، $\frac{H}{D}$ و Re، می باشد. بنابراین در شرایطی که روتور تحت بار باشد و در این محدوده‌ی زاویه ای روبه‌روی باد قرار گیرد، احتمالاً به طور خودکار به حرکت در نخواهد آمد. برای رفع این مشکل، می‌توان یک طبقه روتور دیگر با ٩٠ درجه اختلاف زاویه فاز نسبت به طبقه‌ی اول افزود (شکل (٥)). بدین ترتیب، یک توربین ساونیوس ٢ طبقه دارای گشتاور یکنواخت تری نسبت به توربین یک طبقه خواهد بود و آسانتر به چرخش واداشته می شود؛ اما باید به این نکته نیز توجه داشت که با افزودن طبقات بیشتر، میزان $c_m$ کاهش پیدا می کند؛ زیرا در حالتی که طبقه‌ی اول در بهترین حالت

خود رو به باد قرار می‌گیرد، طبقه‌ی دوم در زاویه‌ای رو به باد قرار خواهد گرفت که گشتاور کم‌تری نسبت به طبقه‌ی اول از باد کسب خواهد کرد؛ به عبارت دیگر، نیروی مقاوم طبقه‌ی دوم، اثر نیروی مفید طبقه اول توربین را تا حدودی خنثی می کند. به همین ترتیب با افزودن طبقات بیشتر به توربین ساونیوس، گشتاور یکنواخت تر ولی بازدهی کم‌تری خواهیم داشت. بنابراین افزودن بیش از ۲ طبقه به روتور ساونیوس چندان مؤثر در افزایش بازدهی واقع نمی‌شود؛ مثلاً یک توربین ساونیوس به ارتفاع ۸ متر با ۲ طبقه از یک توربین ساونیوس ۸ متری با ٤ طبقه، بازدهی بیشتری دارد. برای اطلاعات بیشتر در این زمینه به مرجع [11] مراجعه شود. بهترین راه حل برای داشتن گشتاور یکنواخت استفاده از چرخ طیار (Flywheel) است. از همین رو برای طراحی یک چرخ طیار به نمودار $c_{ms}(\theta)$ نیاز است تا بتوان تغییرات گشتاور راه انداز روتور را به دقت مورد بررسی قرار داد و چرخ طیار بهتری طراحی کرد. البته باید به این نکته توجه نمود که با افزودن چرخ طیار، اینرسی توربین افزایش می یابد و این امر موجب می شود که توربین ساونیوس در اعداد رینولدزهای پایین نچرخد. لازم به یادآوری است که مطابق بررسی های مؤلفین، تاکنون در این خصوص مطالعاتی در مورد روتور ساونیوس پیشرفته ارائه نشده است.

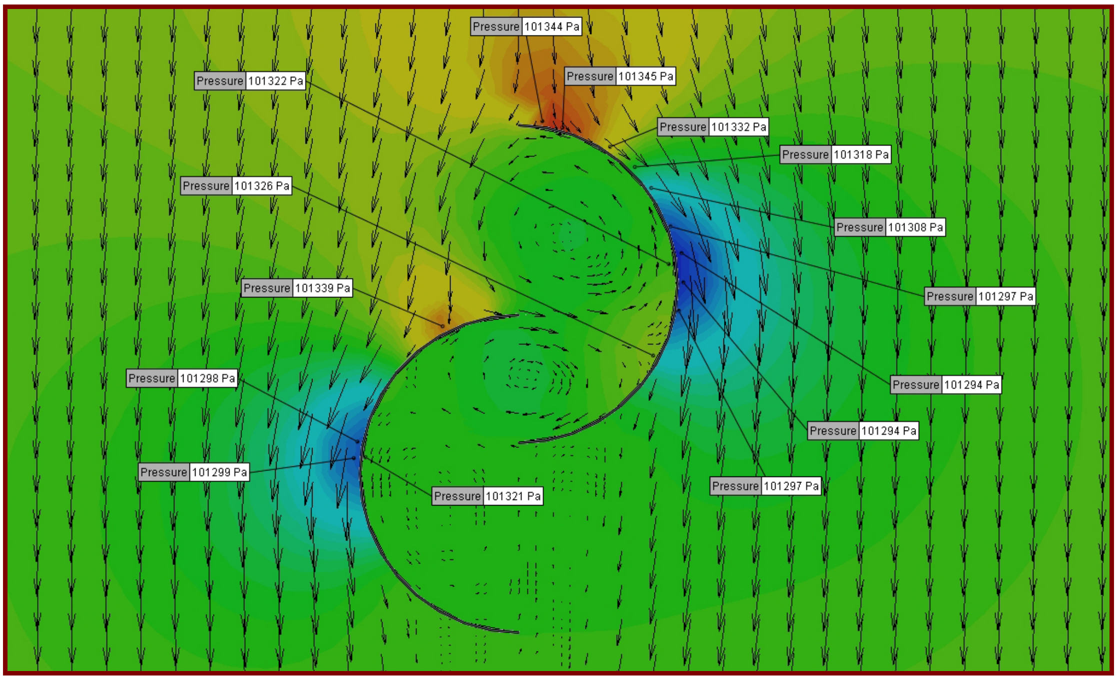
همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شده بود، برای رسیدن به بیشترین بازدهی در روتور ساونیوس باید از صفحات انتهایی در دو سوی روتور استفاده کرد. دلیل این امر را می توان در شکل (۱۸) مشاهده نمود. همان‌طور که در این شکل دیده می شود، بخشی از سیال هوا پس از برخورد به روتور به سمت لبه های روتور حرکت کرده و می گریزد که در نتیجه، حداکثر مومنتوم باد به روتور منتقل نشده و بدین ترتیب بازدهی آن کاهش می یابد. برای جلوگیری از این امر، باید از صفحات انتهایی در روتور استفاده کرد. نکته‌ی دیگر این است که مطابق شکل (۱۸) سیال هوا پس از برخورد به سطح رو به باد از طرف تقعر، ۹۰ درجه تغییر زاویه داده و به سمت بالا یا پایین پره حرکت می‌کند؛ در حالی که می دانیم برای کسب بیشترین مومنتوم در حالت ایده آل، این زاویه باید تا ۱۸۰ درجه افزایش یابد. بدین منظور محور عمودی روتور باید تا حد امکان خمیده شود (شکل (۱۹)). البته این موضوع که با خمیده کردن محور روتور تا چه حد می توان بازدهی روتور ساونیوس را افزایش داد، می تواند موضوع پژوهش های بعدی باشد.



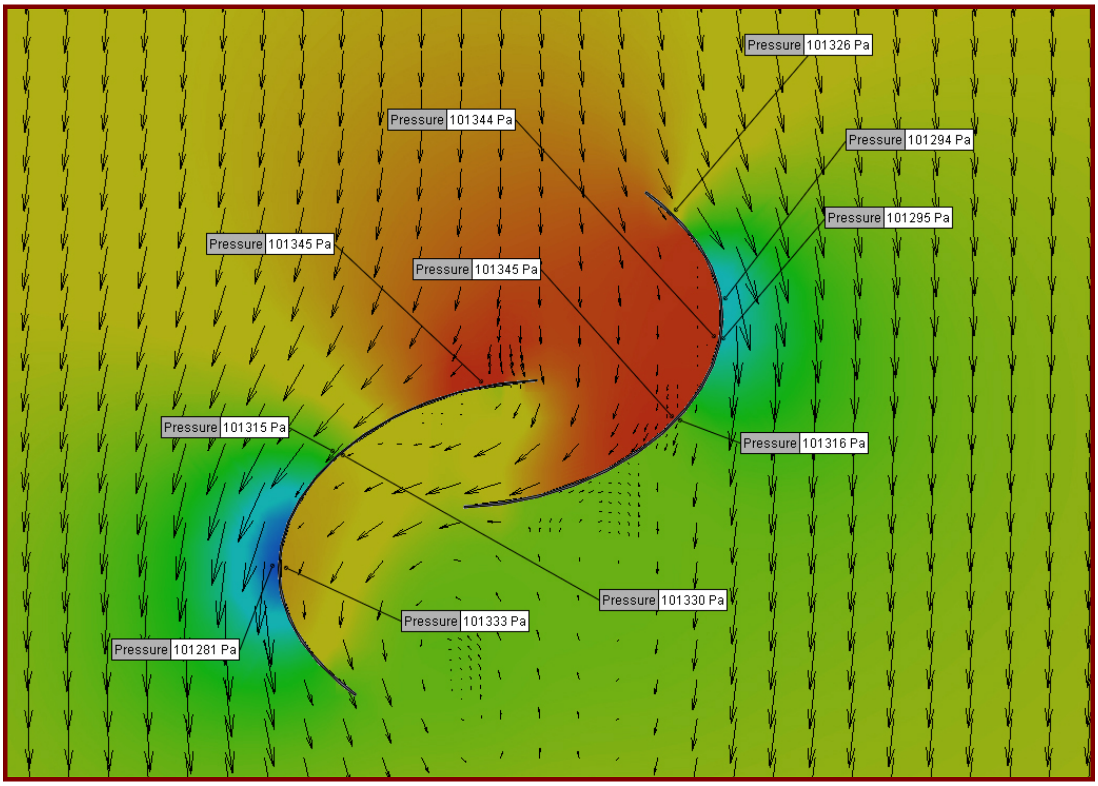

**شکل ۱۳** تغییرات $c_{ms}$ با $\theta$ برای روتور ساونیوس متداول (CSR) و روتور ساونیوس پیشرفته (ASR) در $Re=3.33x10^5$ و $\frac{H}{D}=2$ و $\frac{e}{D}=0.25$



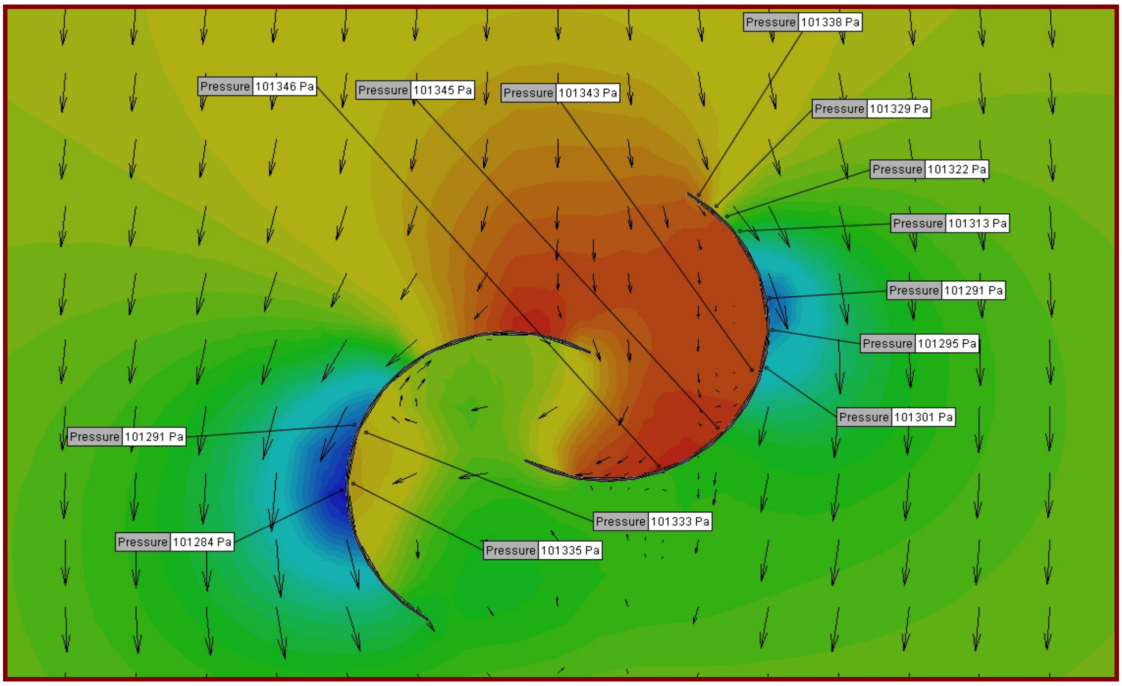

شکل ۱۴ تغییرات میدان سرعت و فشار حول روتور ساونیوس پیشرفته در $\theta = 90^\circ$



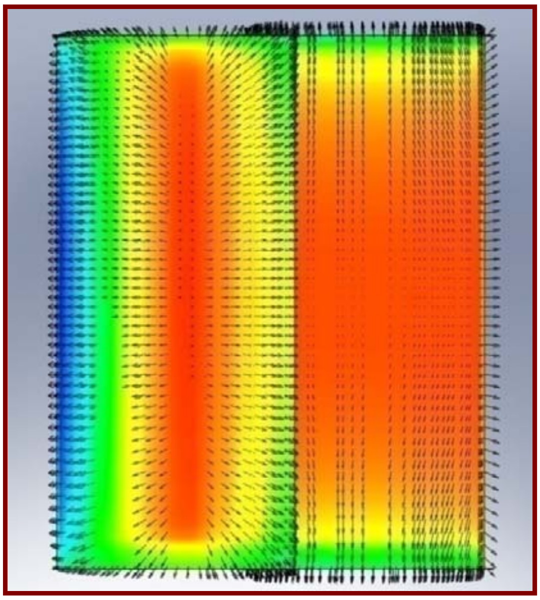

شکل ۱۵ تغییرات میدان سرعت و فشار حول روتور ساونیوس متداول $\theta = 90^\circ$



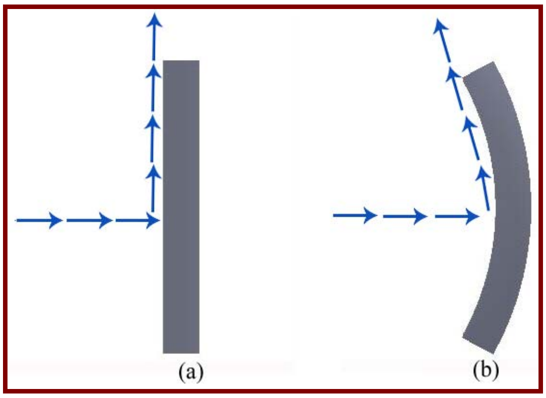

شکل ۱٦ تغییرات میدان سرعت و فشار حول روتور ساونیوس پیشرفته در $\theta = 60^{\circ}$ (در این زاویه گشتاور وارده به روتور دارای بیشترین مقدار است )




شکل ۱۷ تغییرات میدان سرعت و فشار حول روتور ساونیوس متداول در $\theta = 60^{\circ}$ (در این زاویه گشتاور وارده به روتور دارای بیشترین مقدار است)



شکل ۱۸ فرار جریان از لبه های روتور ساونیوس متداول در $\theta = 0^{\circ}$




شکل ۱۹ (a) پره روتور ساونیوس با محور عمود و (b) پره روتور ساونیوس با محور خمیده

## بررسی عملکرد توربین بادی ساونیوس پیشرفته‌ی نصب شده در پژوهشگاه مواد و انرژی

به منظور بررسی عملکرد و بازدهی روتور ساونیوس، روش های مختلفی وجود دارد؛ از آن جمله می توان به شبیه سازی عددی و یا آزمایش روتور در تونل باد اشاره کرد. اما هر دو روش ذکر شده دارای معایبی هستند. برای مثال در اکثر شبیه سازی های عددی جریان، ارتفاع روتور ساونیوس متداول، بی‌نهایت فرض می شود. این فرض کمک می کند تا بتوانیم از شبیه سازی ۲ بعدی برای شرح فیزیکی جریان باد حول روتور استفاده کنیم؛ ولی در عمل، فرض بی‌نهایت بودن ارتفاع روتور کاملاً بی معناست و نمی توان وضعیت سیال را در لبه های روتور و یا در نقاط جدایش تشریح کرد؛ در نتیجه تفاوت هایی بین مدل شبیه سازی شده و مدل واقعی توربین وجود دارد. هم‌چنین شواهدی وجود دارد که در عدد رینولدز یکسان بازدهی روتور ساونیوس در فضای باز بیشتر از بازدهی آن در تونل باد است [6]. به همین دلیل، بهترین راه برای بررسی عملکرد یک توربین، ساخت آن در ابعاد بزرگ و آزمایش آن در شرایط واقعی است. از این رو برای بررسی عملکرد توربین بادی ساونیوس پیشرفته، توربین مستقر در سایت پژوهشگاه مواد و انرژی برگزیده شد. این توربین در منطقه‌ی مشکین دشت کرج، واقع در استان تهران نصب شده است و مشخصات آن در جداول (۷) و (۸) هم چنین شکل های (۲۰) و(۲۱) درج شده است. توربین مورد نظر، دارای ٤ طبقه است و پره‌های آن فاقد صفحات انتهایی هستند. نسبت $\frac{e}{D}$ روتور آن ۰/۲ و نسبت $\frac{H}{D}$ آن برابر با ۱/۲۸ است. این توربین بادی از طریق تسمه – پولی به یک موتور DC متصل است که این موتور، نقش ژنراتور را بازی می کند. در هر لحظه از زمان جریان تولیدی و ولتاژ خروجی موتور به وسیله‌ی آمپرمتر و ولت متر اندازه گیری می شود. توان الکتریکی موتور از طریق فرمول ساده‌ی:

$$P_{Elec} = V[\mathrm{Volt}]\cdot I[\mathrm{Amp}] \qquad (۱۳)$$

به دست می آید. اگرچه توان مکانیکی روتور کمی بیشتر از توان الکتریکی به‌دست آمده از رابطه‌ی بالا ست، ولی با تقریب خوبی می توان از این اختلاف چشم پوشی کرد.

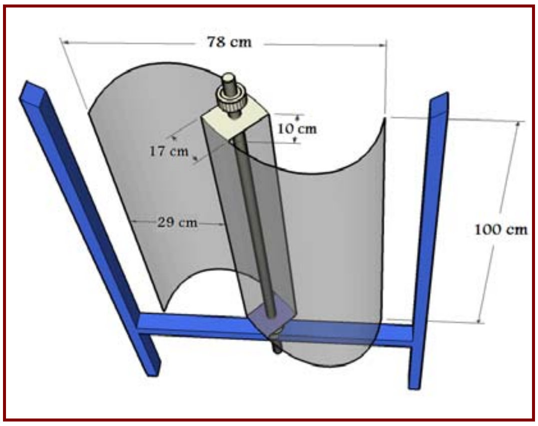
جدول ۷ مختصات پره های روتور ساونیوس پیشرفته ساخته و نصب شده در پژوهشگاه مواد و انرژی

| ردیف | X | Y |
|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 5.2 |
| 3 | 2 | 8.1 |
| 4 | 4 | 11.8 |
| 5 | 6 | 14.2 |
| 6 | 8 | 15.8 |
| 7 | 10 | 17 |
| 8 | 12 | 17.8 |
| 9 | 14 | 18.2 |
| 10 | 16 | 18.5 |
| 11 | 18 | 18.5 |
| 12 | 20 | 18.4 |
| 13 | 22 | 18 |
| 14 | 24 | 17.4 |
| 15 | 26 | 16.7 |
| 16 | 28 | 16 |
| 17 | 30 | 14.9 |
| 18 | 32 | 13.7 |
| 19 | 34 | 12.3 |
| 20 | 36 | 11 |
| 21 | 38 | 9.2 |
| 22 | 40 | 7.5 |
| 23 | 42 | 5.7 |
| 24 | 44 | 3.6 |
| 25 | 46 | 1.4 |

سرعت زاویه‌ای محور توربین ساونیوس مورد نظر، توسط یک دستگاه تاکومتر نوری اندازه‌گیری شده و سرعت باد نیز توسط دستگاه بادسنج محاسبه گردیده است. کلیه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده در جدول ۹ و هم‌چنین نمودار شکل (۲۲) ثبت شده است. اندازه گیری پارامتر سرعت زاویه ای توربین مورد نظر با دشواری هایی همراه بوده است؛ زیرا سرعت باد در هیچ مقطعی از زمان ثابت نبوده و تغییرات سرعت زاویه ای توربین بادی به‌دلیل اینرسال بودن آن با این تغییرات متناسب نبوده و اطلاعات جمع آوری شده به هیچ وجه نمی تواند بیانگر کامل عملکرد توربین ساونیوس مذکور باشد. با این وجود، نمودار شکل (۲۲) می تواند تقریبی از بازدهی روتور ساونیوس پیشرفته با چهار طبقه را در اختیار قرار دهد.

جدول ۸ مشخصات قاب روتور ساونیوس پیشرفته نصب شده در پژوهشگاه مواد و انرژی (کرج- مشکین دشت)

| ردیف | شرح | ابعاد (cm) |
|---|---|---|
| ۱ | ارتفاع دستگاه (طول قاب) | ۷۵۰ |
| ۲ | عرض قاب | ۱۵۰ |
| ۳ | فاصله تا مهار سیم بکسل | ٦۰۰ |
| ٤ | طول بست سیم بکسل | ٤۰ |
| ٥ | قطر خارجی محور اصلی | ۳ |
| ٦ | طول محور اصلی | ٥٤۰ |
| ۷ | ضخامت قاب نگهدارنده پره ها | ۸ |
| ۸ | نگهدارنده یاتاقان کف گرد شماره (۱) | ۸ |
| ۹ | نگهدارنده یاتاقان‌های شماره (۲) تا (٥) | ٤ |




شکل ۲۰ ابعاد روتور ساونیوس پیشرفته‌ی نصب شده در پژوهشگاه مواد و انرژی ( کرج- مشکین دشت) [۸]



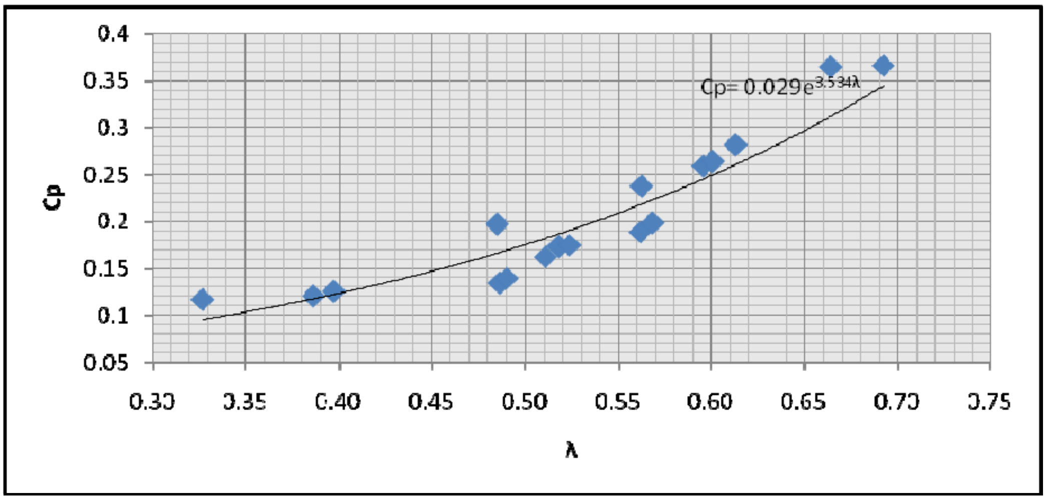
شکل ۲۱ نمای روتور ساونیوس با پره های پیشرفته که در سایت مشکین دشت کرج نصب شده و درحال کار می باشد [۸]

نمودار شکل (۲۲) تغییرات ضریب توان $c_p$ توربین مزبور را بر حسب $\lambda$ نشان می دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، نسبت سرعت لبه‌ی توربین، هرگز به $\lambda = 1$ نرسیده است و بالاترین نسبت سرعت لبه‌ای که توربین تجربه کرده $\lambda = 0.69$ بوده است.

برای به دست آوردن ضریب توان توربین مذکور در هر $\lambda$، از داده های مندرج در نمودار شکل (۲۱) تابعی به صورت زیر گذر داده شده است:

$$c_p = 0.029\, e^{3.534\lambda} \qquad (۱٤)$$

با قرار دادن $\lambda = 0.69$ در رابطه‌ی (۱٤)، $c_p = 0.33$ به دست می‌آید. توربین ساونیوس مورد نظر در نسبت سرعت های بالاتر (نزدیک $\lambda = 1$) دارای ضریب توان بالاتری نیز خواهد بود. دست‌یابی به $c_p = 0.33$ از آن جهت ارزشمند است که نشان می‌دهد توربین ساونیوس پیشرفته در شرایط طبیعی و با وجود اصطکاک و بار مکانیکی بر روی توربین می‌تواند به ضریب توان های بالاتر از ۳۰ درصد برسد و این در حالی است که توربین ساخته شده، توسط ترنکوئیست در دانشگاه کانزاس حداکثر ضریب توان ۳۰ درصد را در $\lambda = 1$ تجربه کرده است [5].




شکل ۲۲ تغییرات $c_p$ با $\lambda$ توربین ساونیوس پیشرفته نصب شده در مشکین دشت کرج

جدول ۹ مقادیر اندازه گیری شده‌ی توان تولیدی توربین ساونیوس، نصب شده در پژوهشگاه مواد و انرژی

| سرعت باد (m/s) | سرعت زاویه‌ای محور روتور (RPM) | $\lambda=(R\omega/V_{wind})$ | سرعت زاویه‌ای شفت ژنراتور (RPM) | $P_{ideal}$ (watt) | $P_{gen} = V\times I$ (watt) | $c_p$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 24 | 0.33 | 84 | 42.16 | 4.92 | 0.117 |
| 3.2 | 52 | 0.66 | 182 | 51.17 | 18.61 | 0.364 |
| 3.2 | 44 | 0.56 | 154 | 51.17 | 12.11 | 0.237 |
| 3.2 | 48 | 0.61 | 168 | 51.17 | 14.39 | 0.281 |
| 3.2 | 38 | 0.48 | 133 | 51.17 | 10.06 | 0.196 |
| 3.4 | 50 | 0.6 | 175 | 61.38 | 16.17 | 0.263 |
| 3.5 | 51 | 0.6 | 178.5 | 66.95 | 17.29 | 0.258 |
| 3.6 | 61 | 0.69 | 213.5 | 72.86 | 26.66 | 0.365 |
| 3.6 | 34 | 0.39 | 119 | 72.86 | 8.78 | 0.120 |
| 3.6 | 35 | 0.4 | 122.5 | 72.86 | 9.12 | 0.125 |
| 3.75 | 48 | 0.52 | 168 | 82.35 | 14.39 | 0.17 |
| 3.9 | 50 | 0.52 | 175 | 92.63 | 16.17 | 0.17 |
| 4 | 50 | 0.51 | 175 | 99.94 | 16.17 | 0.16 |
| 4.2 | 50 | 0.49 | 175 | 115.7 | 16.17 | 0.14 |
| 5 | 60 | 0.49 | 210 | 195.2 | 26.17 | 0.13 |
| 5.23 | 72 | 0.56 | 252 | 223.40 | 42.18 | 0.189 |
| 5.23 | 74 | 0.57 | 259 | 235.13 | 46.59 | 0.198 |

## نتیجه‌گیری و ارائه‌ی راهکار برای بهبود عملکرد روتور ساونیوس

از مطالعات حاضر، طی شبیه سازی کامپیوتری نتیجه می‌شود که گرچه توربین ساونیوس، توربینی شناخته می‌شود که بر اساس نیروی درگ کار می کند، ولی در زوایای $\theta = 70^{\circ}$ تا $\theta = 90^{\circ}$ نیروی مؤثر در تولید توان آن ناشی از نیروی لیفت ایجاد شده در پره های روتور است. بنابراین هر چه شکل پره های روتور ساونیوس به ایرفویل نزدیک تر باشد، بازدهی آن بیشتر خواهد بود. در محدوده‌ی زاویه‌ای $\theta = 70^{\circ}$ تا $\theta = 90^{\circ}$ در عمل نیروی درگ نقش مؤثری در تولید توان ندارد.

در این مقاله نشان داده شد که ضریب توان روتور ساونیوس تابعی از اعداد بی بعد $\frac{e}{D}$ و $\frac{H}{D}$ و $\lambda$ و Re است.

در این تحقیق با یک شبیه سازی عددی توسط نرم افزار FloEFD نشان داده شده که در شرایط یکسان از لحاظ اعداد بی بعد $\frac{e}{D}$ و $\frac{H}{D}$ و $\lambda$ و Re ضریب گشتاور استاتیکی روتور ساونیوس پیشرفته در حدود ۱۱ درصد از روتور ساونیوس متداول بیشتر است. از شبیه سازی عددی رفتار جریان باد در هنگام برخورد به پره‌های روتور ساونیوس، این نکته آشکار می‌شود که بخشی از سیال هوا پس از برخورد با پره، تغییر جهتی ۹۰ درجه‌ای داده که چندان ایده آل نیست و در طراحی پره‌های بهینه باید این زاویه تا حد امکان به ۱۸۰ درجه نزدیک شود که این مستلزم خمیده تر شدن محور قائم پره روتور ساونیوس است.

در این پژوهش یک توربین بادی ساونیوس پیشرفته مورد بررسی عملی قرار گرفت و نتایج به‌دست آمده گویای این امر است که ضریب توان این نوع روتور در $\lambda \approx 0.7$ به $c_p = 0.33$ می‌رسد که در مقایسه با روتور ساونیوس متداول، رقم بالایی است.

**لیست علائم**

شعاع پره روتور ساونیوس: $R[m]$

قطر پره روتور ساونیوس: $D[m]$

ارتفاع پره ساونیوس: $H[m]$

سرعت وزش باد: $V[m/s]$

سرعت زاویه‌ای موتور: $\omega[rad/s]$

نسبت سرعت لبه‌ی پره روتور به سرعت باد: $\lambda$

توان مکانیکی توربین: $P[Watt]$

گشتاور مکانیکی روتور: $M[N.m]$

ضریب توان مکانیکی روتور: $c_p$

ضریب گشتاور دینامیکی روتور: $c_m$

چگالی هوا: $\rho[kg/m^3]$

عدد رینولدز: Re

بازدهی توربین: $\eta[\%]$

توان ایده آل توربین بادی: $P_{id}[Watt]$

میزان هم‌پوشانی اولیه: $e[m]$

قطر محور میانی توربین ساونیوس: $e'[m]$

لزجت: $\mu[Pa.s]$

زاویه‌ی حمله: $\theta(deg)$

ضریب گشتاور استاتیکی: $c_{ms}$

ولتاژ: $V[Volt]$

شدت جریان: $I[Amp]$

توان الکتریکی: $P_{Elec}[Watt]$

## مراجع


۱. مجید جمیل: روتور ساونیوس جهت استفاده از انرژی مکانیکی باد برای تولید برق نشریه‌ی مهندسی مکانیک،شماره‌ی سوم، سال پنجم، ص ۲٤-۲۹، دی ماه (۱۳۷۵).

2. Hau, E. "Wind turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics", Springer Verlag, Berlin, 2nd Ed, pp.68-74, (2006).

3. Gourieres, Desire Le. "Wind Power Plants, Theory and Design", Pergamon Press, Oxford, pp.124-127, (1982).

4. Menet, Jean-Luc and Nachida Bourabaa: Increase in the Savonius Rotor Efficiency via a Parametric Investigation, www.2004ewec.info

5. Turnquist, R.O and F.C Appl: Design and Testing of a Prototype Savonius Wind Machine, *Frontiers of Power Technology Conference,* Oklahoma State University, Stillwater, Okla. Oct.27-28, (1976).

6. Khan, Mozammel H., Model and Prototype Performance Characteristics of a Savonius Rotor Windmill, Wind Engineering, Vol.2, No.2, (1978).

۷. علی کیانی فر- سید محمد جوادی: آزمایش روتور ساونیوس در تونل باد و بهینه سازی شکل هندسی آن در بالابری ضریب توان اولین کنفرانس اکو انرژی ایران، دانشگاه ارومیه (کد مقاله ۱۰۰۱٤) ، ۱۰ تا ۱۲ شهریور (۱۳۸۳).

۸. مجید جمیل- کامبیز دهقانی- امیر مهدی کماریزاده- ابراهیم محجوب مقدس: طراحی، ساخت و نصب توربین بادی مولد جریـان بـرق یکصد واتی از نوع روتور ساونیوس پیشرفته، گزارش نهایی پروژه شناسه ۵۲۷۵۰۳- پژوهشگاه مواد و انرژی- (۱۳۸۷).

9. Gupta,Rajat et al.: CFD Analysis of Two-Bucket Savonius Rotor Using Fluent Package, *European Wind Energy Conference and Exhibition,* Marseille, France, www.ewec2009proceedings.info,

(2009).

10. Reupke, P. and S.D Probert: Slatted-Blade Savonius Wind Rotors, Applied Energy, Vol 40, pp.6-75, (1991).
11. Hayashi Tsutomu,et al.: Wind Tunnel Tests On a Three-Stage Out-phase Savonius Rotor, hayashi@damp.tottori-u.ac.jp
12. Savonius, S.J.: The S-Rotor and it's Applications, Mech. Engineering vol.53, No 5, May (1931).
13. Kawamura, Testuya et al.: Application of the Domain Decomposition Method to the Flow around the Savonius Rotor, 12th Int'l Conf. on Domain Decomposition Methods, www.DDM.org, (2001).
14. Saha, U.K and Rajkumar M.Jaya.: On the Performance Analysis of Savonius Rotor with Twisted Blades, Renewable Energy 31, pp.1776–1788, (2006).

۱۵. ویکتور ال. استریتر، ای. بنجامین وایلی، ترجمه علیرضا انتظاری.– تهران: مکانیک سیالات، انتشارات نـوپردازان، چـاپ نهـم، ص ۲۱۳– ۲۱٤.